

ЦИКЛЫ ПЯТЕННОЙ АКТИВНОСТИ У ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗД

И. Ю. Алексеев¹, А. В. Кожевникова², О. В. Козлова¹

¹*Крымская астрофизическая обсерватория РАН,*

²*Уральский федеральный университет*

Рассмотрены методы и результаты исследования долговременных изменений холодных пятен у звезд поздних спектральных классов.

STARSPOT ACTIVITY CYCLES OF COLD STARS

I. J. Alekseev¹, A. V. Kozhevnikova², O. V. Kozlova¹

¹*Crimean Astrophysical Observatory,* ²*Ural Federal University*

We considered methods and results of the observations of long-term variations of starspots on the late-type stars.

Цикличность солнечной активности была открыта в середине XIX в. любителем астрономии Генрихом Швабе, и сейчас 11-летний солнечный цикл, регулирующий все стороны проявления активности Солнца, от чисел Вольфа, числа и размеров активных областей в хромосфере, частоты и интенсивности вспышек до структуры солнечной короны, характеристик солнечного ветра, солнечно-земных связей, является одним из наиболее известных явлений в жизни Солнца. Помимо этого цикла (или 22-летнего магнитного) известны также вековой (80–90 лет) цикл Глайсберга и Маундеровские минимумы, происходящие раз в два-три столетия. Такие длительные вариации солнечной активности уже исследуются с помощью толщин годовых колец деревьев, содержания в них изотопа ^{14}C , слоистой структуры гренландских и антарктических льдов и позволяют говорить об изменениях солнечной активности на протяжении нескольких тысячелетий. Исследование циклической активности других звезд позволяет говорить об изучении механизма генерации звездных магнитных полей и делать выбор между различными моделями звездного динамо.

Исторически запятненность звезд была обнаружена фотометрически, как вращательная модуляция блеска с типичной амплитудой около 0.10^m , достигающей у самых активных звезд типа T Tauri до 0.5^m (V471 Tau). Изменения конфигурации пятен дают медленные

(с характерным временем от месяца до нескольких лет) смены параметров вращательной модуляции, например, уровня среднего блеска в данную эпоху. Из многолетних фотометрических и фотографических наблюдений длительностью более 50 лет найдена общая переменность классических запятненных звезд до $0.43\text{--}0.56^m$ (например, у оранжевых карликов V775 Her, V833 Tau, BY Dra или RS CVn систем IM Peg и HU Vir). Для Солнца, как запятненной звезды, такие эффекты составляют около 0.001^m .

В настоящее время самым прогрессивным методом изучения звездных пятен является доплеровское картирование. Этот метод позволяет прямо определять площади и широты покрывающих звезду пятен. Метод доплеровского картирования налагает довольно сильные ограничения на выбор объектов (помимо яркости необходима большая скорость вращения) и аппаратуру наблюдений. Тем не менее для десятка запятненных звезд, прежде всего активных гигантов типа RS CVn (IM Peg, II Peg, IL Hya, V711 Tau, EI Eri), а также отдельных одиночных быстро вращающихся гигантов (FK Com и HD 199178) и карликов (AB Dor и LQ Hya), уже накоплены ряды спектральных наблюдений продолжительностью более двух десятков лет [1–4] и др.

Также в настоящее время распространено применение аналогичных методов восстановления изображений к высокоточным фотометрическим наблюдениям [5–7]. Эти наблюдения также охватывают длительные промежутки времени и были применены прежде всего к тем же звездам, что и доплеровское картирование.

При этом остаются распространенными методы оценки площадей и температур пятен по фотометрическим наблюдениям, изначально использующие предположения о пятенной конфигурации. Такие методы наиболее свободны от требований к выбору объектов и наблюдательной аппаратуры и позволяют исследовать очень большие массивы звезд [8] и длительные ряды всех имеющихся фотометрических наблюдений. Например, Алексеев и Кожевникова [9–11] рассматривали моделирование запятненности активных звезд различных типов — молодых звезд, прошедших стадию T Tauri (PTTS), оранжевых (спектральных классов GK) и красных (спектральных классов M) карликов, короткопериодических и классических систем типа RS CVn, одиночных быстро вращающихся желтых гигантов асимптотической ветви типа FK Com.

Эти исследования позволяют оценить цикличность изменений полной площади и средней широты покрывающих звезду пятен

примерно для полусотен звезд. Длительность таких колебаний (5—40 лет) хорошо согласуется с известными длительностями фотометрических циклов рассмотренных звезд. Независимо от эволюционного статуса все программные звезды демонстрируют широтный дрейф пятен по мере их развития, т. е. роста полной площади. При этом мы видим как дрейф пятен в направлении экватора (мы считаем это грубым аналогом солнечной диаграммы бабочек), так и обратный эффект — дрейф пятен к полюсам звезды. Скорости широтного дрейфа пятен $\delta\phi$ довольно сильно варьируются от цикла к циклу и от звезды к звезде, составляя в среднем по модулю 0.2—2.9 °/год, в то время как солнечное значение скорости широтного дрейфа составляет 3—4 °/год. Вероятно, что направление дрейфа пятен и его величина по модулю зависят от спектрального класса звезды.

Общеизвестна секторная структура солнечного магнитного поля и солнечного ветра. Подобные структуры существуют и у других, много более активных звезд. Первые сообщения о существовании у звезд двух выделенных активных долгот появились в конце 1980-х гг. для всех типов запятненных звезд, прежде всего для проэволюционировавших звезд типа классических RS CVn систем и звезд типа FK Com. Активные долготы также хорошо видны из длительных серий доплеровских карт [12], хромосферных [13] и поляризационных наблюдений [14]. Вблизи этих долгот также концентрируются области повышенной электронной плотности хромосферы [15–19] и наиболее мощные вспышки [20].

В 1991 г. Йэтсу и др. [21] обнаружили происходящее время от времени переключение доминирующей активной долготы с одной на другую — так называемый flip-flop эффект. Подобные переключения часто показывают тенденцию к цикличности, хотя у некоторых звезд они могут происходить и нерегулярно. Эффект наличия и переключения активных долгот обнаружен в слабой степени и на Солнце [22]. Длительности циклов переключения активных долгот не совпадают с циклом пятнообразования, но обычно соотносятся как целые числа: $P_{\text{cyc}}/P_{\text{flip-flop}} = 3 : 1, 2 : 1, 3 : 2, 5 : 4$ и пр. В частности, у Солнца обнаружен flip-flop эффект с длительностью около 3.7 (3 : 1) года [22].

По длительным рядам фотометрических наблюдений и доплеровских карт для ряда звезд проводились сопоставления найденных широт пятен с периодами осевого вращения звезды в соответствующие эпохи. Альтернативным вариантом является изучение долговременных изменений положений минимумов блеска звезды (главной и вторичной активных долгот) и их сопоставление с параметрами пятен.

Таким образом, для этих звезд были получены оценки коэффициента дифференциального вращения D_r , определенного аналогично солнечному из соотношения

$$\Omega(\phi) = \Omega_{\text{eq}} - \Delta\Omega \sin^2 \phi,$$

где $\Omega(\phi)$ и Ω_{eq} — скорости вращения звезды на данной широте и экваторе; $\Delta\Omega$ — разница скоростей вращения между полюсом и экватором, а коэффициент дифференциального вращения составляет $D_r = \Delta\Omega/\Omega_{\text{eq}}$. Первые такие оценки были получены с помощью двухпятенной модели и показали для восьми десятков двойных звезд вращение солнечного типа (экватор вращается быстрее полюсов).

В то же время доплеровское картирование показало для некоторых активных гигантов (V711 Tau, UX Ari, HU Vir, V1794 Cyg) отрицательное значение коэффициента D_r , которое соответствует антисолнечному типу вращения (околополюсная зона вращается быстрее экваториальной). Признаки антисолнечного дифференциального вращения были обнаружены и у некоторых звезд солнечного типа по корреляции вращательного периода с ходом линии CaII НК в течение цикла. Вместе с тем эти результаты тоже не являются окончательными, так как разные авторы дают для одной и той же звезды разный характер дифференциального вращения.

Помимо запятненности циклы активности проявляются в эмиссионных линиях хромосферы CaII НК ([23] и многочисленные последующие работы для звезд солнечного типа), в линии H_α ([24], как для молодой post T Tauri звезды VY Ari, так и для быстровращающегося желтого АВГ гиганта IN Com), а также в темпах энерговыделения звездных вспышек и изменениях их энергетического спектра (для EV Lac, AD Leo, YZ CMi обнаружены циклы вспышечной активности продолжительностью 7—8 лет, [20]).

Однако эти эффекты могут быть не коррелированы с запятненностью звезд, и вопрос о совпадении между собой циклов, определяемых разными методами, остается открытым. Если у Солнца цикл Швабе синхронизирует все процессы активности, то для других звезд такой однозначной картины нет. Так, широко известные циклы хромосферной линии CaII могут как совпадать с пятненными (κ Cet = HD 20630), так и не показывать никакой корреляции (например, BE Cet или EK Dra, где нерегулярная переменность линий кальция сочетается с 9-летним фотометрическим циклом). У активной вспыхивающей звезды EV Lac 7-летний цикл вспышечной активности плохо согласуется с пятнообразованием и, кроме того, на-

блюдается длительная (около 40 лет) переменность показателя цвета $U - B$, зависящего от хромосферной активности звезды. Пятенный цикл может быть достаточно плохо коррелирован и с излучением хромосферы в линии H_{α} (LQ Hya, EV Lac), хотя для АВГ гиганта IN Com или молодой звезды VY Ari мы видим обратную картину.

Длительность циклов активности не показывает явных зависимостей от показателя цвета, глубины конвективной зоны, периода вращения или числа Россби. Более удобным параметром оказалось отношение $P_{\text{cyc}}/P_{\text{rot}}$, которое для выборки звезд НК проекта показывает зависимость от потока в линиях $\langle R'_{\text{HK}} \rangle$ и числа Россби. Существует и более общая зависимость $\lg(P_{\text{cyc}}/P_{\text{rot}})$ от $\lg(1/P_{\text{rot}})$, в которую хорошо укладываются циклы, определенные всеми методами (пятнообразование, flip-flop, CaII HK, вспышечная активность, дифференциальное вращение и даже циклические вариации орбитальных периодов у алголей и RS CVn звезд). Из всего множества циклов зависимость выделяет три последовательности: цикл Глайсберга, цикл Швабе и наблюдаемый у ряда звезд короткий цикл.

Работа А. В. Кожевниковой выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7), а также при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006. Работа И. Ю. Алексеева выполнена в рамках плановой темы ФГБУН КраО РАН «Магнитные поля и эволюция магнитной активности звезд». Работа О. В. Козловой и И. Ю. Алексеева частично выполнена в рамках проекта «Активность звезд поздних спектральных классов на разных стадиях эволюции» (грант РФФИ № 16-02-00689).

Библиографические ссылки

1. *Berdyugina S. V.* Starspots: A Key to the Stellar Dynamo // Living Reviews in Solar Physics. — 2005. — Vol. 2. — P. 8.
2. *Kővári Z., Kriskovics L., Oláh K. et al.* Surface differential rotation of IL Hya from time-series Doppler images // Magnetic Fields throughout Stellar Evolution / ed. by P. Petit, M. Jardine, H. C. Spruit : IAU Symposium. — 2014. — Vol. 302. — P. 379—380. 1309.1378.
3. *Strassmeier K. G.* Starspots // Astron. Astrophys. Rev. — 2009. — Vol. 17. — P. 251—308.
4. *Donati J.-F., Brown S. F.* Zeeman-Doppler imaging of active stars. V. Sensitivity of maximum entropy magnetic maps to field orientation // Astron. Astrophys. — 1997. — Vol. 326. — P. 1135—1142.

5. *Berdyugina S. V., Henry G. W.* Butterfly Diagram and Activity Cycles in HR 1099 // *Astrophys. J. Lett.* — 2007. — Vol. 659. — P. L157–L160. astro-ph/0703530.
6. *Savanov I. S., Dmitrienko E. S.* Starspots and Activity of the Flare Star GJ 1243 // *Astronomy Reports.* — 2018. — Vol. 62. — P. 273–280.
7. *Kolbin A. I., Shimansky V. V.* Spotted star light curve numerical modeling technique and its application to HII 1883 surface imaging // *Astrophysical Bulletin.* — 2014. — Vol. 69. — P. 179–190.
8. *Savanov I. S.* Spots on the surfaces of late-type stars // *Astronomy Reports.* — 2014. — Vol. 58. — P. 478–487.
9. *Kozhevnikova A. V., Alekseev I. Y.* Long-term spottedness variations of 16 RS CVn stars // *Astronomy Reports.* — 2015. — Vol. 59. — P. 937–951.
10. *Alekseev I. Y., Kozhevnikova A. V.* Long-term variations in the spottedness of BY Dra M dwarfs // *Astronomy Reports.* — 2017. — Vol. 61. — P. 221–232.
11. *Alekseev I. Y., Kozhevnikova A. V.* Long-term Spot-Coverage Variations of 13 BY Dra G-K Dwarfs // *Astronomy Reports.* — 2018. — Vol. 62. — P. 396–411.
12. *Berdyugina S. V., Tuominen I.* Permanent active longitudes and activity cycles on RS CVn stars // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 336. — P. L25–L28.
13. *Baliunas S. L., Donahue R. A., Soon W. H. et al.* Chromospheric variations in main-sequence stars // *Astrophys. J.* — 1995. — Vol. 438. — P. 269–287.
14. *Huovelin J., Saar S. H., Tuominen I.* Relations between broad-band linear polarization and CA II H and K emission in late-type dwarf stars // *Astrophys. J.* — 1988. — Vol. 329. — P. 882–893.
15. *Alekseev I. Y., Kozlova O. V.* Spots and active regions on the emission-line, red dwarf star V775 Her. // *Astrophysics.* — 2000. — Vol. 43. — P. 245–255.
16. *Alekseev I. Y., Kozlova O. V.* Spots and Active Regions on the Emission-Line Star VY Ari // *Astrophysics.* — 2001. — Vol. 44. — P. 429–439.
17. *Alekseev I. Y., Kozlova O. V.* Starspots and active regions on the emission red dwarf star LQ Hydrae // *Astron. Astrophys.* — 2002. — Vol. 396. — P. 203–211.
18. *Alekseev I. Y., Kozlova O. V.* Starspots and active regions on the chromospherically active binary MS Ser // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 403. — P. 205–215.

19. *Kozlova O. V., Alekseev I. Y.* The stellar wind as a key to the understanding of the spectral activity of IN Com // Bull. Crimean Astrophys. Observatory. — 2014. — Vol. 110. — P. 37–44.
20. *Alekseev I. Y., Gershberg R. E.* Spottedness of red dwarfs: Zonal spottedness models for 13 stars of the by dra type // Astrophysics. — 1996. — Vol. 39. — P. 33–45.
21. *Jetsu L., Pelt J., Tuominen I., Nations H.* The spot activity of FK Comae Berenices // IAU Colloq. 130: The Sun and Cool Stars. Activity, Magnetism, Dynamos / ed. by I. Tuominen, D. Moss, G. Rüdiger : Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag. — 1991. — Vol. 380. — P. 381.
22. *Berdyugina S. V., Usoskin I. G.* Active longitudes in sunspot activity: Century scale persistence // Astron. Astrophys. — 2003. — Vol. 405. — P. 1121–1128.
23. *Wilson O. C.* Chromospheric variations in main-sequence stars // Astrophys. J. — 1978. — Vol. 226. — P. 379–396.
24. *Kozlova O. V., Alekseev I. Y., Kozhevnikova A. V.* Long-Term Spectral Variability of the Spotted Star in Com // Astrophysics. — 2017. — Vol. 60. — P. 41–56.